



HAL
open science

Techniques d'hybridation à base de métaheuristiques pour optimiser des systèmes logistiques

Laurent Deroussi, Nathalie Grangeon, Sylvie Norre

► To cite this version:

Laurent Deroussi, Nathalie Grangeon, Sylvie Norre. Techniques d'hybridation à base de métaheuristiques pour optimiser des systèmes logistiques. Métaheuristiques pour l'optimisation difficile, 2014. <hal-02023663>

HAL Id: hal-02023663

<https://hal.science/hal-02023663v1>

Submitted on 11 Mar 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Chapter 1

Techniques d'hybridation à base de métaheuristiques pour optimiser des systèmes logistiques

Laurent Deroussi, Nathalie Grangeon et Sylvie Norre

Le développement de la recherche opérationnelle depuis l'après-guerre a offert aux entreprises des outils pour traiter leurs problèmes logistiques par une approche quantitative. Pendant longtemps, ces problèmes ont été découpés en sous-problèmes abordés le plus souvent de manière séparée, déconnectés les uns des autres. Il faut dire que les sous-problèmes considérés, qu'ils soient de localisation, de planification, d'ordonnancement, de transport ou autres, sont généralement des problèmes NP-difficiles dont la complexité algorithmique a constitué, et constitue toujours une problématique importante pour de très nombreux chercheurs. Cependant, dans un contexte industriel de plus en plus concurrentiel, les entreprises sont demandeuses d'outils d'aide à la décision capables d'intégrer une vision globale de leur organisation.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les enjeux d'une telle vision, de comprendre les conséquences en termes de modélisation des systèmes logistiques et de dresser un bilan sur les nouvelles techniques permettant d'optimiser leur performance.

Ce chapitre est organisé de la manière suivante. La première partie décrit les systèmes logistiques en général et la chaîne logistique en particulier. Les concepts de synchronisation horizontale et verticale, qui permettent d'avoir une vision globale de la chaîne logistique, y sont développés. Nous montrons également que les techniques hybrides à base de métaheuristiques sont particulièrement adaptées aux caractéristiques des systèmes logistiques. La deuxième partie est justement consacrée à ces techniques hybrides. Les hybridations métaheuristique / méthode d'optimisation et métaheuristique / modèle d'évaluation sont exposées. Dans la dernière partie, nous présentons quelques exemples de problématiques liées à la synchronisation ainsi que des méthodes hybrides proposées dans la littérature.

1.1 Les systèmes logistiques

1.1.1 Définitions, généralités

Selon [17], une chaîne logistique est « un réseau d'entités de production et distribution qui réalisent les fonctions d'approvisionnement de matières premières, de leur transformation en produits semi-finis et/ou finis, et de distribution des produits finis jusqu'aux clients ». Cette définition, choisie parmi de nombreuses autres, illustre le fait qu'une chaîne logistique se compose d'un réseau d'entités physiques (sites, organisations ou acteurs) traversées par des flux physiques, informationnels et financiers. Elle intègre un ensemble d'activités allant de l'approvisionnement en matières premières jusqu'à la consommation finale.

Dans ce chapitre, nous désignerons par système logistique tout ensemble d'entités physiques interconnectées par un réseau logistique, sur lequel circulent des flux matériels et immatériels. Un système logistique représentera donc autant la chaîne logistique globale qu'une partie de celle-ci (en focalisant par exemple sur les entités d'une même organisation, voire sur un site). La logistique interne représente l'ensemble des flux qui circulent dans le système. La logistique d'approvisionnement (ou amont) regroupe les flux d'entrée (fournisseurs de rang divers), tandis que la logistique de distribution (ou aval) regroupe les flux de sortie (clients : grossistes, détaillants, consommateurs finaux). La figure 1.1 présente un exemple de chaîne logistique.

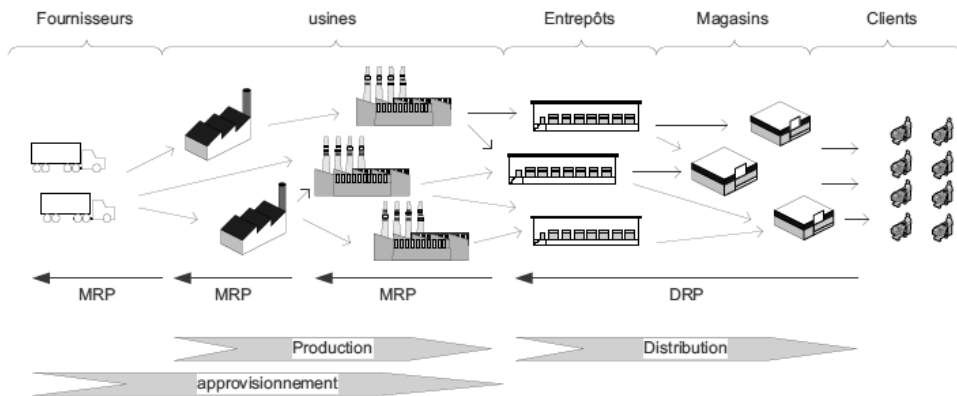


Figure 1.1: Une chaîne logistique

Les travaux de [15] sur la dynamique des systèmes ont permis de mettre en évidence que l'efficacité d'une organisation résultait de la coordination de ses composantes. Le concept de Gestion de la Chaîne Logistique, terme proposé pour la première fois en 1982 par Oliver & Webber, était né.

De très nombreuses définitions de la gestion de la chaîne logistique ont été proposées [48]. Parmi elles, nous retiendrons celle proposée par [41], qui décrit la gestion de la chaîne logistique comme un ensemble d'approches utilisées pour intégrer efficacement les acteurs intervenant aux différentes étapes du processus de fabrication (fournisseurs, fabricants, entrepôts, magasins) de telle sorte que la marchandise soit fabriquée et distribuée avec la bonne quantité, au bon endroit, et au bon moment, avec l'objectif de minimiser l'ensemble des coûts tout en garantissant une qualité de service pour les clients.

1.1.2 Importance d'une vision intégrée d'une chaîne logistique

L'optimisation d'un composant du système logistique peut avoir un impact positif ou négatif sur la performance globale du système. En ce sens, il est important de considérer le système dans sa globalité, en intégrant la logistique amont (approvisionnement en matières premières, fournisseurs, ...) et aval (grossistes, détaillants, distributeurs, clients, ...). Cette intégration est multiple :

Fonctionnelle : le bon fonctionnement d'un système logistique inclut de nombreuses activités (localisation de sites, conception du réseau logistique, transports des produits, gestion d'entrepôt, gestion des stocks, logistique de production, conception des produits et cycle de vie, système d'information, logistique d'approvisionnement, de distribution, ...) qu'il faut coordonner. Le concept MRP (Material Requirements Planning), également désigné par « Calcul des Besoins Nets » (CBN) [34] est né dans les années 1970 du besoin de synchroniser les quantités de matières premières et de produits semi-finis de manière à satisfaire la demande externe exprimée par les clients, on parle de synchronisation des flux physiques.

Temporelle : [47] propose la méthode MRP II (Manufacturing Resource Planning) qui est une évolution de la méthode MRP notamment par la prise en compte des capacités (d'approvisionnement, de production, de stockage, de distribution, financière). Cette approche repose sur la définition d'une structure hiérarchique en cinq plans qui œuvrent chacun sur un horizon temporel et avec un niveau de précision des données qui leur sont propres. Ces plans sont : le plan stratégique, le plan industriel et commercial (PIC), le plan directeur de production (PDP), le calcul des besoins nets (CBN) et le pilotage d'atelier.

Géographique : La méthode MRP II est à l'origine une approche mono-site. Cependant, les systèmes logistiques actuels sont pour la plupart multi-site, ce qui implique des décisions en termes de localisation des sites, de transport de produits (approvisionnement, production et distribution), de prise en compte de délais d'acheminement, ... [45] estiment le concept de gestion de la chaîne logistique comme une extension de l'approche MRP II.

[20] définissent la coordination comme étant toute action ou approche qui conduisent les acteurs d'un système logistique à agir de manière à améliorer le fonctionnement du système dans son ensemble. La coordination entre ces acteurs constitue un grand challenge pour la recherche opérationnelle, que ce soit dans une vision centralisée (les acteurs sont regroupées au sein d'une même organisation qui prend les décisions pour l'ensemble) ou décentralisée (chaque acteur est autonome dans ses décisions). [40] décrivent les modèles de réseaux logistiques qui peuvent être considérés à chacun des trois niveaux décisionnels, à savoir les niveaux stratégique, tactique et opérationnel. Le niveau stratégique regroupe tout ce qui concerne la conception du réseau logistique avec en particulier des problèmes de localisation de sites (Facility Location Problem ou FLP). Le niveau tactique décrit les politiques de gestion des flux avec par exemple les problèmes de taille de lots (Lot Sizing Problem). Le niveau opérationnel concerne le pilotage de la chaîne logistique et recouvre les problèmes d'ordonnancement (Flow Shop Problem, Job Shop Problem, ...). Les auteurs concluent que chacun des niveaux interagit avec les autres, et qu'une approche qui unifie les trois niveaux est nécessaire pour concevoir et piloter un réseau logistique compétitif.

[23] définit quant à lui les concepts de synchronisation horizontale et verticale, qui regroupe les deux exemples précédents. La synchronisation horizontale représente les difficultés de synchronisation entre les différentes entités logistiques de la chaîne (par exemple un plan réalisé pour un site de production peut ne pas être réalisable en raison de contraintes d'approvisionnement). La synchronisation verticale consiste à organiser les décisions dans le temps. Les différents plans de la méthode MRP II sont revus à des fréquences différentes pouvant entraîner une désynchronisation entre eux. Il s'agit de s'assurer qu'une modification effectuée pour un plan reste cohérente pour les plans inférieurs.

La figure 1.2 détaille les différents problèmes liés à la planification de la chaîne logistique et montre l'importance des concepts de synchronisation pour une meilleure coordination des flux.

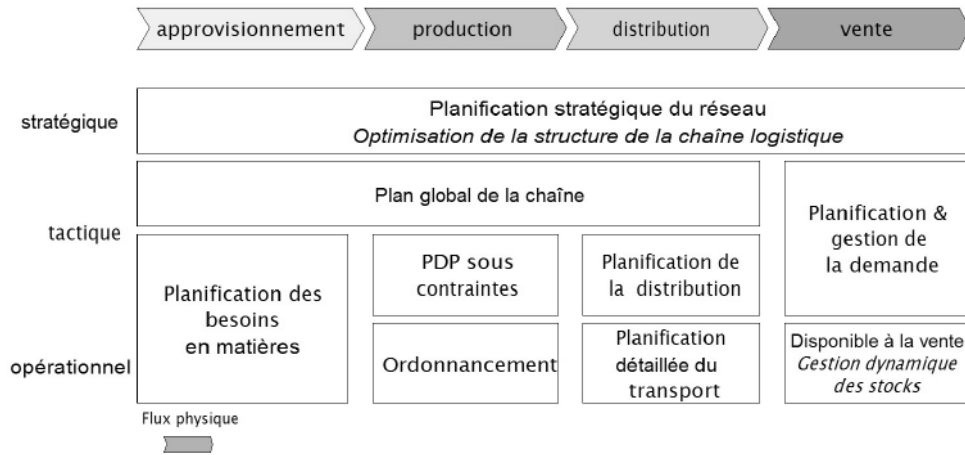


Figure 1.2: Problématique de la planification des chaînes logistiques [28]

1.1.3 Difficultés liées à l'optimisation de la performance d'une chaîne logistique

Le fait d'adopter une vision globale des systèmes logistiques et d'intégrer les problématiques de synchronisation permet d'optimiser sa performance et de la rendre plus compétitive. Cela soulève un certain nombre de difficultés à surmonter. Ces difficultés sont liées à :

La construction d'un modèle : Un système logistique est complexe à modéliser, il faut définir les acteurs, les entités, les activités et les interactions entre les entités. Les règles de gestion peuvent être complexes ou difficiles à définir. Le recueil de la connaissance et des données peut être une tâche longue et difficile.

Une complexité algorithmique : La plupart des modèles classiques, indépendamment de l'entité ou du niveau décisionnel correspondent à des problèmes NP-difficiles. Nous n'en avons mentionné que quelques uns, il devient nécessaire de les combiner dans une optique de synchronisation horizontale ou verticale.

La taille des systèmes étudiés : Les systèmes logistiques sont le plus souvent de grande taille (nombre d'acteurs, de produits, ...), ce qui rend plus difficile leur résolution.

La prise en compte des incertitudes : Plus le niveau décisionnel est élevé et plus les incertitudes sont grandes. Le niveau tactique concerne un horizon temporel relativement long, généralement de deux à cinq ans. Sur un tel horizon, il y a des incertitudes importantes sur la demande ou l'environnement économique. Il est important que le système puisse s'adapter et rester performant face à ces incertitudes. [42] présente un état de l'art sur la prise en compte des incertitudes sur les problèmes de localisation de sites.

Le degré de finesse des modèles : Un système logistique possède une masse de données considérable. Il sera nécessaire d'agrèger plus ou moins ces données selon le niveau décisionnel considéré et les objectifs poursuivis. Par exemple le PIC travaille sur une famille de produits, tandis que le PDP est au niveau des produits.

L'évaluation de la compétitivité : Les critères de performance définis sont généralement la minimisation des coûts (de transport, de stockage, de production, ...) et la maximisation d'un taux de service client. Outre que le fait que ces critères peuvent être difficiles à évaluer, ils sont aussi contradictoires.

La gestion des risques : pannes des machines au niveau opérationnel ; gestion de la maintenance des unités de production, étude de la réactivité du système par rapport à une catastrophe naturelle.

1.1.4 Système d'information et système d'aide à la décision (Decision Support System)

La performance d'un système logistique se mesure dans son aptitude à maîtriser les flux qui la traversent, qu'ils soient matériels, informationnels ou financiers. Une des clés se trouve dans le partage de l'information entre les différents acteurs du système. Chaque acteur doit être à-même de pouvoir consulter à tout instant l'ensemble des informations dont il a besoin pour pouvoir prendre les meilleures décisions possibles. C'est l'un des rôles majeurs du système d'information (SI), qui regroupe une masse de données toujours plus considérable, par exemple au travers d'outils tels que les ERP (Enterprise Resource Planning). Si ces outils permettent de gérer les flux d'information, ils sont difficilement exploitable en l'état pour prendre des décisions. C'est tout l'enjeu de l'informatique décisionnelle que [21] définit comme étant l'ensemble des outils qui aident une entreprise à mieux comprendre, analyser, explorer et prédire ce qui se passe au sein de l'entreprise et dans son environnement. La figure 1.3 montre comment s'articulent ces outils. Les outils de type ETL (Extract-Transport-Load) permettent d'extraire les données en provenance de différentes sources, de les mettre en forme (validation, filtrage, transformation, agrégation) et de les stocker dans l'entrepôt de données (Data Warehouse). Ces données sont ensuite disponibles pour être utilisées par les outils d'analyse et d'aide à la décision tels que ceux dont nous parlons dans ce chapitre.

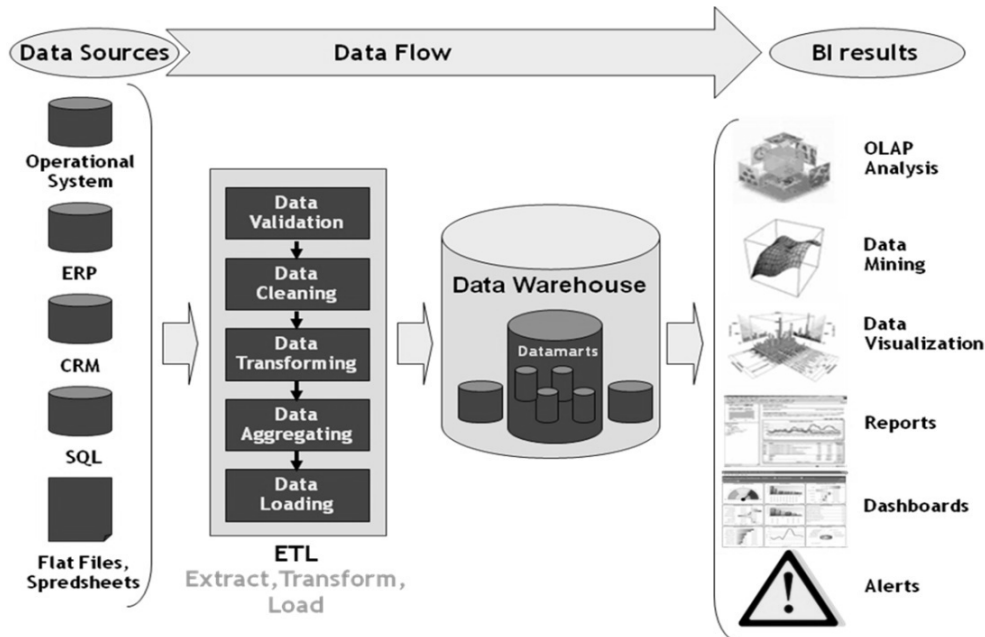


Figure 1.3: Informatique décisionnelle [21]

1.1.5 Intérêt des métaheuristiques

Nous avons pointé quelques difficultés qui sont à surmonter pour l'optimisation d'un système logistique. Reprenons l'exemple de la chaîne logistique dans son ensemble. Elle est constituée d'un réseau complexe de sites et d'organisations avec des activités interconnectées mais des objectifs divers et contradictoires. [24] souligne que les métaheuristiques ont un rôle majeur à jouer dans les outils d'aide à la décision pour la chaîne logistique. Elles possèdent d'excellentes qualités pour pouvoir résoudre les problèmes très complexes qui apparaissent dans la gestion de la chaîne logistique. Les éléments mis en avant sont les suivants :

- Ces méthodes sont généralement simples, faciles à implémenter, robustes et ont déjà faits leur preuve dans la résolution de problèmes d'optimisation difficiles.
- Leur nature modulaire conduit à des temps de développement et de maintenance courts, ce qui leur donne un avantage sur d'autres techniques pour des applications industrielles.
- Leur capacité à pouvoir manipuler de grandes masses de données, plutôt que de devoir agréger des données ou simplifier un modèle afin d'obtenir un problème solvable mais qui ne représenterait que partiellement la réalité.
- Leur capacité à gérer les incertitudes, à pouvoir étudier plusieurs scénarii, plutôt que de proposer une solution exacte à partir d'un modèle dont la plupart des données sont des estimations.

Cela revient à considérer un problème global comme étant composé de plusieurs sous-problèmes, dont chacun pris séparément serait déjà un problème NP-difficile,

de manière à optimiser un ou plusieurs indicateurs de performance préalablement définis avec une incertitude des données. Il n'existe pour l'heure aucun modèle qui permettrait de prendre en compte toute la difficulté d'un système logistique. Les outils d'aide à la décision qui sont développés le sont généralement dans un objectif précis, ce qui permet d'opter pour la vision du système qui semble la plus appropriée (choix de l'horizon, degré de finesse des données, définition du ou des critères d'évaluation, ...), au prix d'un certain nombre d'hypothèses simplificatrices. Il semble cependant essentiel de pouvoir garantir que les solutions proposées resteront cohérentes que ce soit pour les autres acteurs ou pour d'autres échelles de temps.

1.2 Les techniques hybrides

Il est indéniable que les métaheuristiques ont un rôle important à jouer pour pouvoir intégrer toute la difficulté d'un système logistique, mais il est tout aussi indéniable que les métaheuristiques seules se suffisent pas. C'est pourquoi nous souhaitons mettre en avant les techniques hybrides à base de métaheuristiques auxquelles nous consacrons cette section.

1.2.1 Généralités

Les méthodes d'optimisation sont des techniques qui permettent d'optimiser le fonctionnement d'un système en minimisant (ou maximisant) un ou plusieurs critères de performance. Pour les problèmes d'optimisation combinatoire, elles sont traditionnellement séparées en deux catégories : les méthodes exactes et les méthodes approchées. Les méthodes exactes permettent d'obtenir la solution optimale et de prouver l'optimalité. Elles regroupent des techniques qui proviennent de la programmation linéaire en nombres entiers (PLNE) telles que les méthodes de Branch-and-Bound, Branch-and-Cut ou la relaxation lagrangienne. Les méthodes approchées sont utilisées dès lors qu'une solution optimale est hors d'atteinte (en raison de la taille des instances, de l'impossibilité de modéliser le problème sous forme linéaire, ...). Parmi les méthodes approchées, nous retrouvons les métaheuristiques, qui s'appuient pour la plupart sur des recherches locales. Les méthodes d'optimisation sont adaptées pour traiter la complexité algorithmique des systèmes étudiés.

Dans certains cas, les critères de performance d'un système peuvent ne pas se calculer de manière simple. Il est alors nécessaire de faire appel à un modèle d'évaluation des performances (modèle de simulation déterministe ou stochastique, modèle markovien). [33] définit pour ces systèmes la notion de complexité structurelle et fonctionnelle. L'auteur introduit la notion de double complexité (figure 1.4) et préconise un couplage entre une méthode d'optimisation et un modèle d'évaluation des performances pour résoudre des problèmes liés à la double complexité. Nous utiliserons dans la suite du chapitre le terme de méthode d'évaluation. Une méthode désignera alors indifféremment une méthode d'optimisation et une méthode d'évaluation.

Nous avons montré dans la section précédente que les systèmes logistiques que nous souhaitons étudier sont caractérisés par deux éléments :

- d'une part par la volonté d'adopter une vision globale, dans le cadre d'une synchronisation horizontale ou verticale, ce qui peut amener à considérer le système logistique comme une combinaison de plusieurs problèmes d'optimisation.

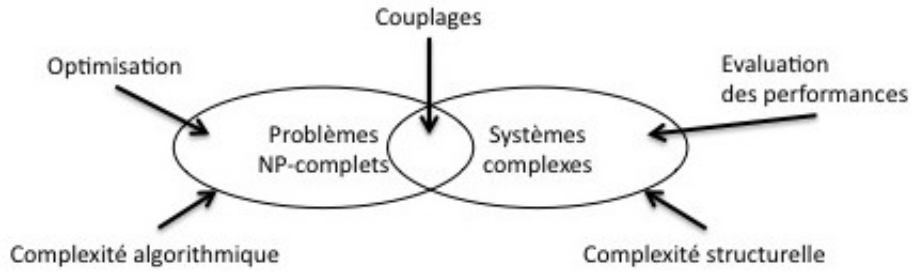


Figure 1.4: La double complexité

- d'autre part, par l'objectif d'améliorer la compétitivité du système. Cela nécessite d'évaluer sa performance en tenant compte de critères parfois contradictoires et de nombreuses incertitudes.

Les techniques d'hybridation entre une métaheuristique et une autre méthode, qu'elle soit d'optimisation ou d'évaluation des performances, peuvent être décomposées en trois grandes classes :

chainage de méthodes ($A \rightarrow B$) - figure 1.5 : les deux méthodes A et B sont utilisées de manière séquentielle. La méthode A résout une partie du problème (par exemple en fixant un sous-ensemble de variables). L'autre partie du problème est résolue par la méthode B. Un exemple classique est l'utilisation d'une méthode d'optimisation pour déterminer une solution réalisable du problème et ensuite une métaheuristique pour optimiser cette solution.

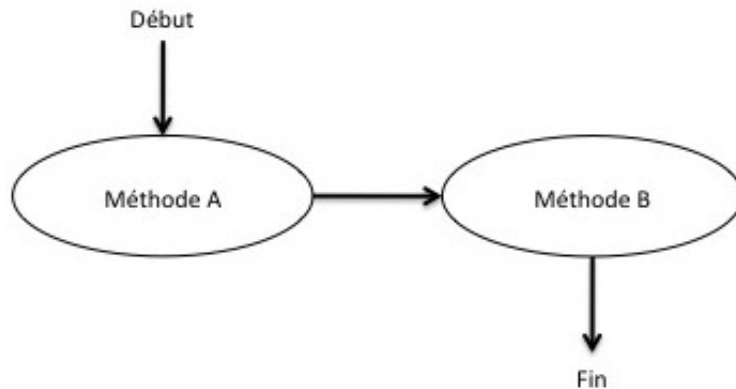


Figure 1.5: Principe du chainage de deux méthodes

couplage séquentiel de méthodes ($A \rightleftharpoons B$) - figure 1.6 : les deux méthodes A et B sont utilisées de manière séquentielle et itérative. Le résultat de la méthode B est réinjecté en entrée de la méthode A, ce qui permet d'itérer le processus de résolution.

couplage hiérarchique de méthodes ($A \downarrow B$) - figure 1.7 : Les méthodes sont utilisées selon un schéma «maître - esclave». Par exemple, la méthode A génère

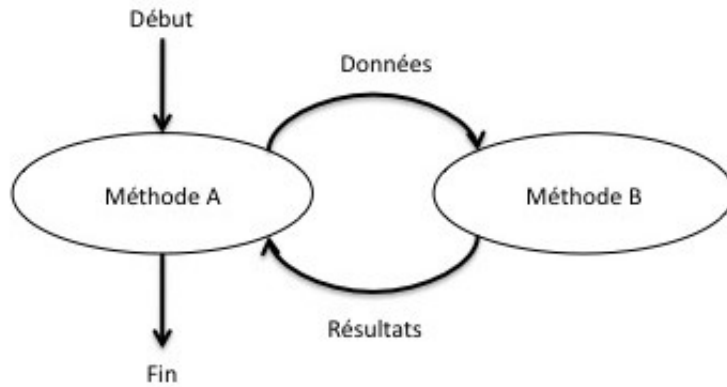


Figure 1.6: Principe du couplage séquentiel de deux méthodes

une ou plusieurs solutions dont les critères de performance sont optimisés ou évalués avec la méthode B.

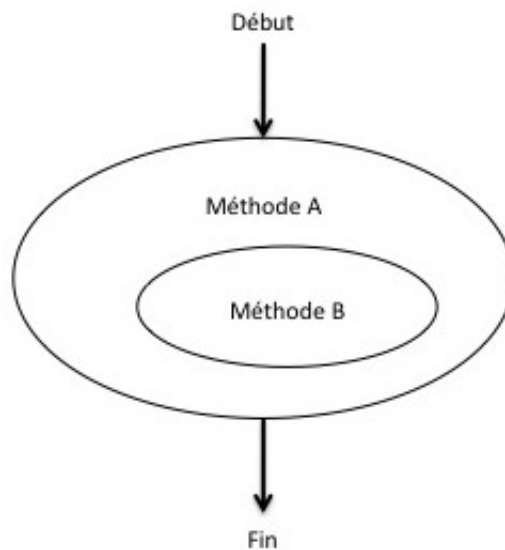


Figure 1.7: Principe du couplage hiérarchique de deux méthodes

Ces trois techniques peuvent être recombinaées pour former des méthodes hybrides plus élaborées. Par exemple : $(A \rightarrow ((B \downarrow C) \Leftrightarrow D))$ signifie que la méthode A est suivie d'un couplage hiérarchique entre une méthode B et une méthode C, couplé séquentiellement avec une méthode D.

Nous proposons dans cette section d'exposer deux types de méthodes hybrides à base de métaheuristiques : l'hybridation Métaheuristique / Méthode d'optimisation qui est par exemple bien indiquée lorsqu'un problème se décompose en sous-problèmes,

et l'hybridation Métaheuristique / Méthode d'évaluation des performances qui est utile lorsque les critères d'évaluation des performances sont difficiles à calculer.

1.2.2 L'hybridation Métaheuristique / Méthode d'optimisation

[6] constatent qu'un nombre croissant de métaheuristiques sont publiées qui ne suivent pas à la lettre le paradigme d'une métaheuristique traditionnelle seule. Au contraire, elles combinent des composants algorithmiques qui peuvent provenir de méthodes d'optimisation d'autres domaines que celui des métaheuristiques. Ce sont ces approches que les auteurs définissent comme étant des métaheuristiques hybrides. Les métaheuristiques hybrides sont apparues il y a environ deux décennies. Elles ont depuis lors démontré leur efficacité pour résoudre des problèmes d'optimisation difficile. Nous présentons d'abord l'hybridation entre deux métaheuristiques avant de parler de l'hybridation d'une métaheuristique avec une autre méthode d'optimisation.

L'hybridation métaheuristique / métaheuristique est une technique qui consiste à combiner deux métaheuristiques entre elles. Le but poursuivi est de concevoir une méthode qui sait tirer bénéfice des avantages de chacune. L'exemple souvent donné en illustration est l'hybridation (Pop \downarrow Ind) entre un algorithme à population (par exemple un algorithme évolutionnaire ou d'optimisation par essaim particulaire) et une méthode à individu (par exemple une recherche locale, un recuit simulé ou une méthode tabou). Une telle hybridation profite du caractère exploratoire de la méthode à population, et de faculté de la méthode à individu à intensifier la recherche dans les zones prometteuses de l'espace de recherche. Il existe de nombreux exemples d'hybridation dans la littérature, beaucoup en combinant une métaheuristique avec une méthode de recherche locale (Méta \downarrow LS). L'hybridation (Algorithme génétique \downarrow LS) est une technique souvent utilisée dans la littérature, et connue sous le terme de memetic algorithms [29] ou Genetic Local Search [27]. L'hybridation (recuit simulé \downarrow LS) est connu sous le terme de C-L-O (Chained Local Optimization) [25] ou SALO (Simulated Annealing Local Optimization) [10] et fait partie de la famille des recherches locales itérées [24] dans lequel le critère d'acceptation suit le processus du recuit. [44] propose une taxonomie des méthodes hybrides, essentiellement basée sur le degré d'encapsulation d'une technique dans une autre et le degré de parallélisation.

Durant ces dernières années, de très nombreuses approches de résolution combinent une métaheuristique ou une autre méthode d'optimisation. Plusieurs propositions de classifications ont été proposées dans la littérature [11], [36] et [19]. Par exemple, dans la première référence citée, les auteurs répartissent les techniques d'hybridation en cinq grandes familles:

- utiliser des méthodes exactes pour explorer des voisinages de grande taille dans des algorithmes de recherche locale,
- appliquer plusieurs répliques d'un algorithme de recherche locale et exploiter l'information contenue dans des solutions de bonne qualité pour définir un sous problème de taille réduite, solvable avec une méthode exacte,
- exploiter les bornes dans des heuristiques de construction,
- utiliser l'information obtenue à partir d'une relaxation d'un modèle de PLNE pour guider la recherche locale,
- utiliser des algorithmes exactes pour résoudre des sous-problèmes spécifiques dans les métaheuristiques hybrides.

[13] présentent une cartographie de ces méthodes hybrides selon les problèmes d'optimisation traités. Parmi les problèmes concernant les systèmes logistiques, on y retrouve de nombreuses références pour la conception de réseaux logistiques (p-median), l'élaboration de tournées de véhicules (TSP ou VRP), la résolution de problèmes de planification (lot-sizing) ou d'ordonnancement (flow-shop, job shop, ...).

La programmation par contrainte (PPC) est une technique d'optimisation qui consiste à modéliser un problème à l'aide de variables de décision et de contraintes. La recherche d'une solution s'appuie sur la propagation des contraintes, qui restreignent les champs de valeurs que peuvent prendre les variables. Au contraire des métaheuristiques, La PPC est reconnue pour être une technique efficace pour résoudre des problèmes de décision, mais peu efficace pour les problèmes d'optimisation. L'idée est donc venue d'hybrider ces deux techniques afin de tirer bénéfice de leurs avantages respectifs. Deux stratégies sont possibles suivant quelle est la méthode d'optimisation qui pilote la méthode hybride. La première consiste à développer une métaheuristique dans laquelle la programmation par contrainte est utilisée comme un outil efficace pour explorer des voisinages de grande taille. La deuxième consiste à développer une méthode de recherche arborescente et à utiliser une métaheuristique ou bien pour améliorer des noeuds de l'arbre, ou bien pour explorer des chemins voisins de celui défini par l'algorithme glouton d'exploration d'arbre. [14] et [46] constituent deux premières lectures sur le sujet. Cette technique hybride a été utilisée avec succès sur des problèmes de tournées de véhicules [8] ou des problèmes d'ordonnancement [5].

1.2.3 L'hybridation Métaheuristique / Méthode d'évaluation des performances

Les modèles d'évaluation des performances permettent de prendre en compte la complexité structurelle et fonctionnelle des systèmes logistiques. Leur utilisation est particulièrement adaptée dès lors que :

- les indicateurs de performance qui sont définis ne peuvent pas être calculés par des fonctions analytiques simples. Le fonctionnement du système est régi par des règles complexes. Il est alors nécessaire de simuler le fonctionnement du système pour en évaluer sa performance.
- certaines données sont modélisées par des lois statistiques et il est nécessaire de répliquer un grand nombre de fois le fonctionnement d'un système pour intégrer des notions de robustesse.

Dans cette partie, nous allons centrer notre discours sur les modèles de simulation. Les termes d'optimisation par simulation, ou d'approche conjointe simulation / optimisation sont en effet couramment utilisés dans la littérature. Pour preuve, les logiciels commerciaux de simulation à événements discrets comprennent depuis longtemps des modules d'optimisation basés sur des algorithmes évolutionnaires, scatter search, un recuit simulé ou une méthode taboue comme on peut le voir dans [16] ou [2]. La technique d'hybridation qui en résulte (simulation ↓ optimisation) est la suivante : la méthode d'optimisation fournit des solutions qui sont évaluées par le logiciel à événements discrets. [16] discutent des autres types de liaisons qui peut exister entre l'optimisation et la simulation.

Dans le contexte de la gestion de la chaîne logistique, de nombreux travaux montrent l'intérêt de cette hybridation. Le lecteur qui souhaite approfondir le sujet pourra consulter [1] qui donnent un état de l'art récent. La figure 1.8 extraite de cet article

montre bien les interactions entre le module d'optimisation et le modèle de simulation. Le modèle de simulation permet de gérer les incertitudes et la complexité du système.

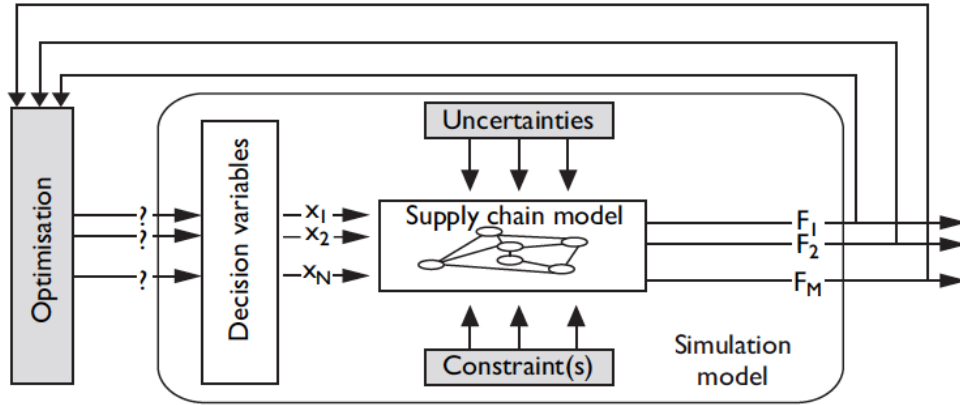


Figure 1.8: Exemple de couplage Optimisation / simulation pour une chaîne logistique [1]

[26] utilisent cette technique hybride sur une chaîne logistique selon une approche décentralisée. Chaque acteur de la chaîne est représenté par un agent et tous les agents sont intégrés dans le modèle de simulation. Ce modèle est couplé (figure 1.9) avec un algorithme génétique pour la partie optimisation. Plus récemment, une approche analogue a été menée par [32] avec de la PLNE.

1.3 Application pour le pilotage de la chaîne logistique

1.3.1 Préambule

Nous avons montré l'importance de considérer l'étude d'un système logistique dans sa globalité. [18] notent que l'un des intérêts majeurs des métaheuristiques pour l'étude des problèmes logistiques est que ces méthodes permettent de prendre en compte plusieurs problèmes simultanément (les auteurs utilisent le terme de problèmes hybrides). Les auteurs mentionnent un certain nombre d'exemples qui sont les suivants :

- Problèmes de localisation / tournées de véhicules (location routing problem): Il s'agit de déterminer l'emplacement des sites de production et des entrepôts combiné avec le problème de distribution.
- Problèmes de stockage / tournées de véhicules (inventory routing problem): Ce problème consiste à distribuer un produit à un ensemble de clients sur un horizon de temps. Chaque client ayant sa propre consommation et capacité de stockage.
- Problèmes d'achat / tournées de véhicules : décisions relatives au choix des fournisseurs et à l'élaboration des tournées.

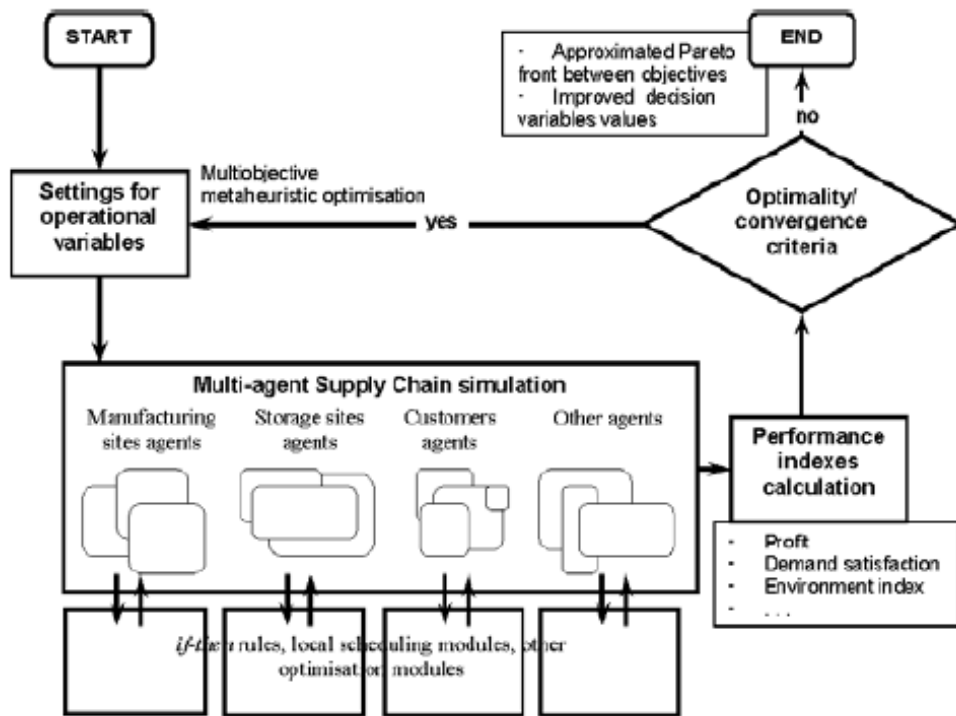


Figure 1.9: Exemple de couplage métaheuristique / simulation pour une chaîne logistique décentralisée [26]

- Problème de conception de réseaux logistiques multi-échelle : décisions relatives au nombre et à l'emplacement de différentes entités physiques de la chaîne logistique (sites de production, plates-formes de distribution, détaillants, ...)

Ces exemples illustrent des combinaisons de problèmes concernant la conception de réseaux logistiques. Les trois premiers problèmes définissent une synchronisation verticale en intégrant deux niveaux de décision: l'un relatif à la conception de réseau logistique (choix de l'emplacement des sites, des fournisseurs, des fréquences de livraison) et l'autre à l'élaboration des tournées. La résolution conjointe de ces problèmes permet d'obtenir de meilleurs résultats que si ces problèmes avaient été considérés séparément. Le dernier exemple définit une synchronisation horizontale entre les échelons de la chaîne logistique. Les auteurs considèrent ce problème comme hybride en tant que combinaison de plusieurs problèmes de conception de réseau, un pour chaque échelon (choix des localisation des sites de production et des plates-formes de distribution par exemple).

En plus de ces quelques exemples, de nombreuses autres combinaisons de problèmes s'avèrent intéressantes à étudier dans le contexte de la gestion de la chaîne logistique. Parmi elles, nous pouvons citer pour la synchronisation horizontale:

- planification tactique: avec l'étude des problèmes de taille de lots multi-site,
- ordonnancement multi-site: avec la prise en compte du transport des produits entre les sites,
- distribution des produits finis aux clients: mutualisation des transports

et pour la synchronisation verticale:

- planification tactique: synchronisation du Plan Industriel et Commercial et des Plan Directeurs de Production,
- ordonnancement: synchronisation entre le prédictif (ordonnancement hors-ligne) et le réactif (ordonnancement en-ligne).

Les méthodes mises en œuvre pour résoudre ces problèmes combinés sont généralement basées sur la décomposition en revenant aux problèmes de base. Une méthode d'optimisation est associée à chacun des problèmes de base. Nous retrouvons les trois grandes classes de méthodes que nous avons définies dans la section précédente:

- le chaînage de méthodes : cette technique peut être utilisée lorsqu'on a un problème «maître» et un problème «esclave», comme c'est le cas par exemple dans la synchronisation verticale où les décisions prises au niveau le plus élevé ont des répercussions sur le niveau inférieur. Ces méthodes consistent à résoudre séquentiellement le problème "«maître" puis le problème "«esclave" ". La solution obtenue par la première méthode est donnée en entrée de la deuxième méthode.
- le couplage séquentiel : ces méthodes reprennent le schéma précédent, mais au lieu de s'arrêter, la deuxième méthode remonte de l'information à la première méthode, relançant ainsi le processus de résolution. Dans cette démarche, les méthodes de résolution sont considérées au même niveau. La difficulté de ce type d'approche est la définition des informations circulant d'une méthode à l'autre.

- le couplage hiérarchique : contrairement aux méthodes itératives, ce couplage induit une priorité sur les méthodes. La première méthode fait appel à la seconde méthode durant son exécution pour résoudre un sous-problème.

Ces combinaisons de problèmes constituent une étape permettant d'aller vers une vision intégrée de la chaîne logistique dans la prise de décision. C'est pourquoi nous proposons de mettre en avant quelques uns d'entre eux (planification de la production, Location Routing Problem, Lot-Sizing Problem et Système Flexible de Production) et de présenter, pour chacun d'eux, une sélection de méthodes hybrides à base de métaheuristiques qui ont été proposées dans la littérature. La figure 1.10 montre les types de synchronisation correspondant à chacun des problèmes.

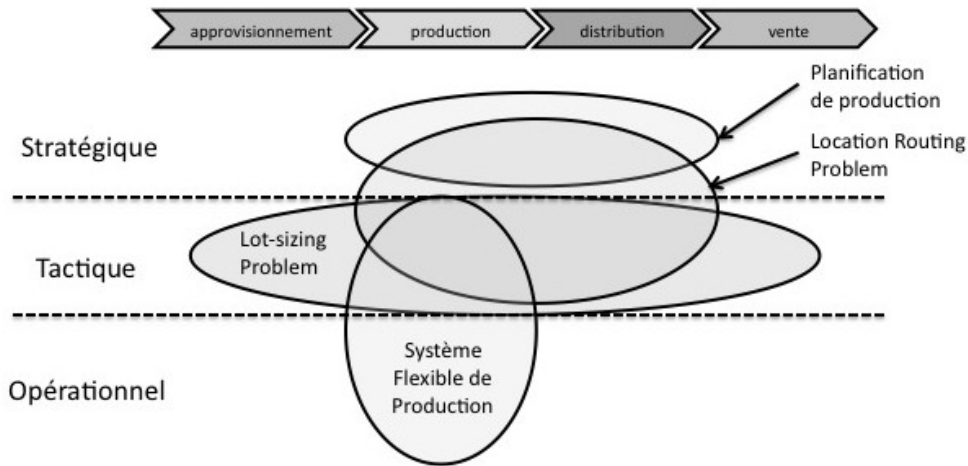


Figure 1.10: Problèmes choisis et types de synchronisation

1.3.2 Planification de la production

[43] s'est intéressé à la planification de la production et de la distribution de produits à horizon stratégique dans un réseau logistique à deux échelons composé de sites de production et de zones de commercialisation.

Soient N l'ensemble des types de produits, PZ (resp. SZ), l'ensemble des zones de production, (resp. de commercialisation), DL l'ensemble des routes. $o_{k,u}$ (resp. $d_{k,v}$) vaut 1 s'il existe la route de distribution $k \in DL$ débute (resp. finit) à la zone de production $u \in PZ$ (resp. la zone de commercialisation $v \in SZ$). $fd_{i,v}$ représente la demande prévisionnelle de la zone de commercialisation $v \in ZC$ en produit de type $i \in N$. La production d'un produit nécessite une ou plusieurs technologies de production, $xc_{i,t}$ vaut 1 si le type de produit $i \in N$ nécessite la technologie de production $t \in PT$. La capacité de production de la technologie de production $t \in PT$ de la zone de production $u \in PZ$ doit être comprise entre $cap_min_{t,u}$ et $cap_max_{t,u}$.

L'objectif est la minimisation des coûts d'achat de matières premières, de production et de distribution. $sc_{i,u}$ représente le coût d'achat des matières premières pour un produit de type $i \in N$ réalisé par la zone de production $u \in PZ$. $fc_{t,u}$ (resp. $vc_{t,u}$) représente le coût fixe (resp. le coût variable) pour la technologie de production $t \in PT$ et la zone de production $u \in SZ$. $tc_{i,k}$ (resp. $dr_{i,k}$) est le coût unitaire

de transport (resp. le taux de taxe) pour le type de produit $i \in N$ et la route de distribution $k \in DL$.

Les variables du modèle sont les suivantes :

$P_{i,u}$	la quantité de produits de type $i \in N$ fabriqués par la zone de production $u \in PZ$
$Y_{i,k}$	la quantité de produits de type $i \in N$ transportés sur la route de distribution $k \in DL$
$mc_{i,u}(P)$	le coût unitaire de fabrication d'un produit du type $i \in N$ par la zone de production $u \in PZ$
$dc_{i,k}(P)$	le coût unitaire de distribution d'un produit du type $i \in N$ sur la route de distribution $k \in PZ$

$$\min z = \sum_{i=1}^N \sum_{k \in DL} Y_{i,k} \cdot dc_{i,k} \quad (1.1)$$

sous les contraintes :

$$\sum_{k \in DL} d_{k,v} \cdot Y_{i,k} = fd_{i,v}, \quad \forall i \in N, \forall v \in SZ \quad (1.2)$$

$$\sum_{i \in N} xc_{i,t} \cdot P_{i,u} \leq cap_max_{t,u}, \quad \forall t \in PT, \forall u \in PZ \quad (1.3)$$

$$\sum_{i \in N} xc_{i,t} \cdot P_{i,u} \geq cap_min_{t,u}, \quad \forall t \in PT, \forall u \in PZ \quad (1.4)$$

$$\sum_{k \in DL} o_{k,u} \cdot Y_{i,k} = P_{i,u}, \quad \forall i \in N, \forall u \in PZ \quad (1.5)$$

$$mc_{i,u} = \sum_{\substack{t \in PT / \\ xc_{i,t} > 0}} \left(\frac{fc_{t,u}}{\sum_{\substack{i' \in N / \\ xc_{i',t} > 0}} P_{i',u}} + xc_{i,t} \cdot vc_{t,u} \right) \quad \forall i \in N, \forall u \in PZ \quad (1.6)$$

$$dc_{i,k} = tc_{i,k} + dr_{i,k} \cdot \left(\sum_{u \in PZ} o_{k,u} \cdot (sc_{i,u} + mc_{i,u}) \right) \quad \forall i \in N, \forall k \in DL \quad (1.7)$$

$$P_{i,u} \geq 0, \quad \forall i \in N, \forall u \in PZ \quad (1.8)$$

$$Y_{i,k} \geq 0, \quad \forall i \in N, \forall k \in DL \quad (1.9)$$

La contrainte 1.2 concerne le respect de la demande. La contrainte 1.5 indique que le stockage n'est pas autorisé dans les zones de production. Les contraintes 1.3 et 1.4 expriment le respect des capacités des technologies de production. La contrainte 1.6 permet le calcul du coût unitaire de production. La contrainte 1.7 concerne le calcul du coût unitaire de distribution. Les quantités produites et distribuées sont positives selon les contraintes 1.8 et 1.9.

Pour contourner la non-linéarité de la fonction objectif, le problème a été décomposé en deux sous-problèmes : le premier concerne la détermination des quantités à produire par chaque site de production et le second s'intéresse à la distribution de ces produits vers les zones de commercialisation. Cette décomposition est partie du constat que le second problème revient à un problème de transport classique formalisable par un modèle linéaire. La métaheuristique hybride proposée (figure 1.11) s'intéresse

donc uniquement à la répartition des quantités à produire, la distribution, pour une répartition donnée étant assurés par la résolution du modèle linéaire. La méthode proposée se note (ILS \Leftrightarrow PL).

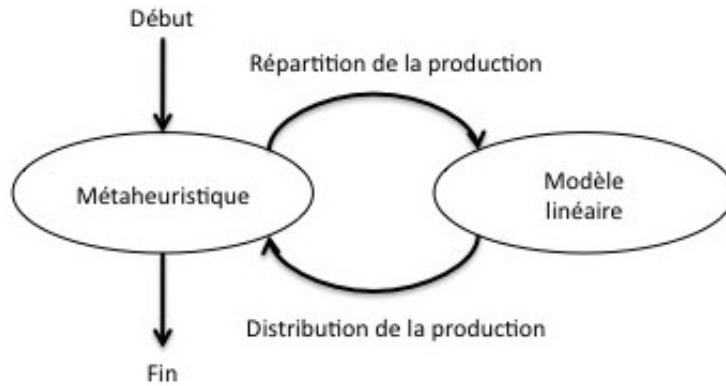


Figure 1.11: Metaheuristique hybride proposée par [43]

1.3.3 Location routing problem

C'est un problème de synchronisation parmi les plus anciens et les plus étudiés. Il combine deux problèmes NP-difficiles: le Facility Location Problem (FLP) et le Vehicle Routing Problem (VRP). Il s'agit de déterminer la localisation d'installations à ouvrir parmi un ensemble d'installations potentielles, d'affecter tous les clients à une installation ouverte et de résoudre le problème de tournées de véhicules. L'objectif est de minimiser l'ensemble des coûts, à savoir les coûts d'ouverture des installations, les coûts des véhicules et les coûts des distances parcourues.

Soient $V = I \cup J$ l'ensemble des sommets du graphe où I désigne l'ensemble des localisations potentielles pour les dépôts, et J l'ensemble des clients. A chaque dépôt $i \in I$ est associé une capacité W_i et un coût d'exploitation O_i . Chaque client $j \in J$ a une demande d_j . Les coûts de déplacement entre deux sommets i et j est $c_{i,j}$. K désigne l'ensemble d'une flotte homogène de véhicules de capacité Q . Un coût fixe F est imputé aux véhicules utilisés dans la tournée.

Les variables du modèles sont les suivantes :

$$\begin{aligned} y_i &= 1 && \text{si le dépôt } i \in I \text{ est ouvert, } 0 \text{ sinon,} \\ f_{i,j} &= 1 && \text{si le client } j \in J \text{ est livré par le dépôt } i \in I, 0 \text{ sinon,} \\ x_{i,j,k} &= 1 && \text{si le véhicule } k \in K \text{ emprunte l'arc } (i,j) \in V^2. \end{aligned}$$

$$\min z = \sum_{i \in I} O_i y_i + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} c_{i,j} x_{i,j,k} + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} F x_{i,j,k} \quad (1.10)$$

Sous les contraintes :

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in V} x_{i,j,k} = 1, \quad \forall j \in J \quad (1.11)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{i \in V} d_j x_{i,j,k} \leq Q, \quad \forall k \in K \quad (1.12)$$

$$\sum_{j \in V} x_{i,j,k} - \sum_{j \in V} x_{j,i,k} = 0, \quad \forall k \in K, \forall i \in V \quad (1.13)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{i,j,k} \leq 1, \quad \forall k \in K \quad (1.14)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{i,j,k} \leq |S| - 1, \quad \forall S \subset J, \forall k \in K \quad (1.15)$$

$$\sum_{u \in J} x_{i,u,k} + \sum_{u \in V \setminus j} x_{u,j,k} \leq 1 + f_{i,j}, \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (1.16)$$

$$\sum_{j \in J} d_j f_{i,j} \leq W_i y_i, \quad \forall i \in I \quad (1.17)$$

$$x_{i,j,k} = \{0, 1\}, \quad \forall i \in V, \forall j \in V, \forall k \in K \quad (1.18)$$

$$y_i = \{0, 1\}, \quad \forall i \in V \quad (1.19)$$

$$f_{i,j} = \{0, 1\}, \quad \forall i \in V, \forall j \in V \quad (1.20)$$

L'objectif (1.10) est de minimiser la somme de trois termes : les coûts d'exploitation, les coûts de transport et les coûts des véhicules. La contrainte (1.11) stipule que chaque client appartient à une et une seule tournée. Les capacités des véhicules sont respectées par la contrainte (1.12) et celle des dépôts par la contrainte (1.17). Les contraintes (1.13) et (1.14) garantissent la cohérence des tournées. Les contraintes (1.15) sont les contraintes d'élimination des sous-cycles. La contrainte (1.16) assure qu'un client est livré. Les contraintes (1.18) à (1.20) indiquent que les variables sont binaires.

Ce modèle est basé sur les modèles du CPLP (Capacitated Plant Location Problem) et du VRP. Le CPLP est un modèle de localisation mono-période. Une fois la structure du réseau défini, il est impossible de le faire évoluer dans le temps. Une perspective à ces travaux pourrait être de coupler un modèle multi-période avec le VRP.

[30] proposent un état de l'art sur ce problème. Les auteurs précisent qu'en dehors de quelques problèmes spécifiques pour lesquelles les méthodes exactes sont efficaces, la plupart des méthodes de résolution sont des méthodes approchées hybrides qui s'appuient sur la décomposition du problème en deux sous-problèmes: le FLP et le VRP.

[35] proposent une méthode itérative en deux phases. La première phase est une relaxation lagrangienne qui résout le sous-problème de localisation. Pour cette phase, les clients de chaque route sont agrégés en un super-client. Cette agrégation est obtenue à partir de la solution initiale ou à partir de la solution obtenue à l'itération précédente. La seconde phase résout le problème de tournées de véhicules à l'aide d'une recherche tabou hybridée avec une recherche locale. Un mécanisme de réinitialisation d'une solution initiale, qui tient compte de l'historique des solutions obtenues, est réalisée pour prévenir une convergence prématurée de l'algorithme dans un minimum local. Cette méthode peut se noter (RL) \Leftrightarrow ((TS)↓(LS)).

[7] considèrent un LRP à deux échelons. Un premier échelon est composé d'installations de grande capacité, situées généralement loin des clients, et un deuxième échelon contenant des installations dites satellites, de capacité moindre. Ils décomposent le problème en deux LRP mono-échelon, chacun étant de nouveau décomposé en deux sous-problèmes: un problème de localisation avec capacité (CFLP - Capacitated Facility Location Problem) et un VRP multi-dépôt. Les auteurs proposent une recherche tabou dans laquelle ils combinent une approche itérative sur les deux problèmes mono-échelons, et hiérarchique pour chacun d'eux ((TS) \downarrow (TS)) \Leftrightarrow ((TS) \downarrow (TS)).

1.3.4 Le Multi-Plant Multi-Product Capacitated Lot-Sizing Problem

Les problèmes de taille de lots consistent à déterminer sur un horizon à moyen terme (de 6 à 18 mois) découpé en périodes, les quantités de produits à fabriquer de manière à minimiser la somme des coûts (production, lancement et stockage) tout en garantissant la satisfaction de la demande à chaque période. Les coûts de lancement sont en général une estimation de la perte de productivité due à un changement de production et qui nécessite des réglages sur la ligne de production. La contrainte de capacité assure que le potentiel de production à chaque période n'est pas dépassé. Il y a plusieurs sites de production. Le modèle présenté inclut plusieurs produits ce qui permet de gérer une nomenclature et de faire du CBN (calcul des besoins nets).

Le modèle mathématique qui est donné ici a été proposé par [39]. Les données du problème sont les suivantes :

M désigne l'ensemble des sites de production, N l'ensemble des produits et T l'ensemble des périodes. $d_{i,j,t}$ représente la demande pour le produit i au site j à la période t . $P_{j,t}$ désigne la capacité de production du site j à la période t . $M_{i,j,t}$, $V_{i,j,t}$ et $H_{i,j,t}$ représentent respectivement les coûts de production, de lancement et de stockage pour le produit i au site j à la période t . $r_{j,k,t}$ représente le coût de transport d'une unité de produit du site j vers le site k . $u_{i,j}$ représente le taux de production et $s_{i,j}$ le temps de lancement du produit i au site j .

Les variables de décision sont :

- $x_{i,j,t}$ la quantité de produit $i \in I$ fabriquée sur le site $j \in M$ pendant la période $t \in T$,
- $I_{i,j,t}$ la quantité de produit $i \in N$ en stock sur le site $j \in M$ pendant la période $t \in T$,
- $w_{i,j,k,t}$ la quantité de produit $i \in N$ transportée de $j \in M$ vers $k \in M$ pendant la période $t \in T$,
- $z_{i,j,t}$ = 1 s'il y a un lancement de production du produit $i \in N$ au site $j \in M$ à la période $t \in T$, 0 sinon

$$\min \quad z = \sum_{i \in N} \sum_{j \in M} \sum_{t \in T} \left(M_{i,j,t} x_{i,j,t} + V_{i,j,t} z_{i,j,t} + H_{i,j,t} I_{i,j,t} + \sum_{k \in M \setminus \{j\}} r_{j,k,t} w_{i,j,k,t} \right) \quad (1.21)$$

sous les contraintes

$$I_{i,j,t} = I_{i,j,t-1} + x_{i,j,t} - \sum_{k \in M \setminus \{j\}} w_{i,j,k,t} + \sum_{l \in M \setminus \{j\}} w_{i,l,j,t} - d_{i,j}, \quad \forall i \in N, \forall j \in M, \forall t \in T \quad (1.22)$$

$$x_{i,j,t} \leq \left(\sum_{j \in M} \sum b = t^T d_{i,j,b} \right) z_{i,j,t}, \quad \forall i \in N, \forall j \in M, \forall t \in T \quad (1.23)$$

$$\sum_{i \in N} \left(\frac{x_{i,j,t}}{u_{i,j}} + s_{i,j} z_{i,j,t} \right) \leq P_{j,t}, \quad \forall j \in M, \forall t \in T \quad (1.24)$$

$$x_{i,j,t} \geq 0, I_{i,j,t} \geq 0, \quad \forall i \in N, \forall j \in M, \forall t \in T \quad (1.25)$$

$$w_{i,j,k,t} \geq 0, \quad \forall i \in N, \forall j \in M, \forall k \in M \setminus \{j\} \quad (1.26)$$

$$z_{i,j,t} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in N, \forall j \in M, \forall t \in T \quad (1.27)$$

L'objectif est de minimiser la somme des coûts de production, de lancement, de stockage et de transport de façon à satisfaire les différentes contraintes du problème. La contrainte (1.22) indique l'équilibre des stocks entre deux périodes consécutives. La contrainte (1.23) impose un lancement de production pour pouvoir produire sur une période. La contrainte (1.24) assure que la capacité de production n'est pas dépassée. Les contraintes (1.25) à (1.27) sont les contraintes de positivité, d'intégrité et de binarité des variables.

[31] proposent une hybridation GRASP/Path relinking ((GRASP) \Leftrightarrow (PR)). GRASP [12] est une métaheuristique de type multi-start, qui s'apparente à une recherche locale itérée. Cette méthode consiste à générer des solutions à partir d'une méthode gloutonne randomisée, chacune de ces solutions servant de solution initiale pour une recherche locale. Path-relinking est une technique initialement proposée pour la recherche tabou, mais qui a été également hybridée avec succès dans des algorithmes génétiques [37] ou GRASP [38]. Cette technique consiste à explorer une trajectoire dans l'espace de recherche en reliant deux solutions. L'hybridation consiste à garder en mémoire un ensemble de solutions élites, et à construire de nouvelles solutions en connectant ces solutions élites avec celles générées par GRASP.

Pour ce type de problèmes, nous trouvons beaucoup de travaux mentionnant l'utilisation de techniques comme la relaxation lagrangienne (des capacités de production et des coûts) ou de la programmation par contraintes. Les métaheuristicques sont moins utilisées car les problèmes de taille de lots ne se prêtent pas aisément à la définition d'un voisinage. Le fait d'augmenter ou de diminuer même légèrement la production d'un produit sur un site et pendant une période peut avoir des répercussions sur les périodes amont et aval. Un exemple de voisinage est par exemple décrit en détail dans [23]. Le développement de nouvelles méthodes hybrides entre une métaheuristique et de la programmation par contraintes nous semble une piste d'investigation prometteuse pour ce type de problème.

1.3.5 Les systèmes flexibles de production

Nous consacrons cette partie à l'étude d'un système logistique réduit à un site de production : les systèmes flexibles de production (SFP). Dans la chaîne logistique, les SFP sont dédiés à la transformation d'un produit. Les SFP sont des systèmes entièrement automatisés dans lesquels on retrouve des îlots de production (que nous

désignerons par abus de langage par machines) interconnectés par un système de transport. Les systèmes de transport les plus communément utilisés sont les véhicules automatiquement guidés ou chariots filoguidés. Les SFP ont la réputation d'être coûteux et difficiles à piloter, mais ils offrent l'avantage d'être flexibles, c'est-à-dire de pouvoir s'adapter aux fluctuations de la demande. La littérature les concernant est abondante. Nous conseillons [22] en première lecture.

Un des intérêts des SFP est que nous retrouvons à l'intérieur d'un site des problématiques analogues à celles énoncées pour les systèmes logistiques multi-site. Nous retrouvons les problèmes de conception de l'atelier avec le Facility Layout Problem qui consiste à positionner les îlots de production dans l'atelier de manière à minimiser les flux physiques qui transiteront à l'intérieur, de conception du système de transport, du positionnement des points de chargement / déchargement, de dimensionnement de la flotte de véhicules, d'ordonnancement « hors-ligne » (prédictif, les véhicules utilisent un parcours prédéfini pour aller d'un point A à un point B), d'ordonnancement « en ligne » (dynamique, les véhicules déterminent leur parcours en temps réel en fonction du trafic). Ces problèmes sont en général traités séparément en raison de leur difficulté, bien que de nombreux auteurs en reconnaissent les limites.

[9] ont étudié la synchronisation verticale entre les problèmes de conception et d'ordonnancement dans un SFP. Les auteurs se sont placés dans le cadre d'un réagencement d'atelier (niveau tactique) pour lequel les zones de production et le réseau de transport restaient inchangés. Seules des permutations de machines étaient possibles à l'intérieur des zones de production. Le problème considéré se formalise sous la forme d'un problème d'affectation quadratique.

Le problème est modélisé sous la forme d'un atelier de type job-shop. M désigne l'ensemble des machines et L l'ensemble des zones de production (l'objectif étant d'affecter les machines aux zones de production, nous avons clairement $|L| = |M|$). O désigne l'ensemble des opérations à effectuer, $o_{i,j} \in O$ étant la $i^{\text{ème}}$ opération de la $j^{\text{ème}}$ pièce. Une opération fictive est ajoutée en début de gamme pour chaque pièce correspondant à l'entrée de la pièce dans l'atelier. O^+ désigne l'ensemble de toutes les opérations (réelles et fictives). $\mu_{i,j}$ renseigne sur le type de machine requis pour réaliser l'opération $o_{i,j} \in O$ et $\tau_{m,\mu_{i,j}} \in \{0, 1\}$ est une matrice de compatibilité entre les machines et les types. Enfin, t_{l_1,l_2} est la matrice des temps de transport entre les zones l_1 et l_2 .

Les variables de décision sont :

$$\begin{aligned} x_{m,l} &= 1 \text{ si la machine } m \in M \text{ est affectée à la zone } l \in L, 0 \text{ sinon} \\ y_{o_{i,j},l} &= 1 \text{ si l'opération } o_{i,j} \in O^+ \text{ est affectée à la zone } l \in L, 0 \text{ sinon} \end{aligned}$$

$$\min z = \sum_{o_{i,j} \in O} \sum_{l_1 \in L} \sum_{l_2 \in L} t_{l_1,l_2} y_{o_{i,j},l_1} y_{o_{i,j},l_2} \quad (1.28)$$

sous les contraintes

$$\sum_{m \in M} x_{l,m} = 1, \quad \forall l \in L \quad (1.29)$$

$$\sum_{l \in L} x_{l,m} = 1, \quad \forall m \in M \quad (1.30)$$

$$\sum_{l \in L} y_{o_{j,i},l} = 1, \quad \forall o_{i,j} \in O^+ \quad (1.31)$$

$$y_{o_{i,j},l} \leq \sum_{m \in M} \tau_{m,\mu_{i,j}} x_{m,l} \quad \forall o_{i,j} \in O^+, \forall l \in L \quad (1.32)$$

$$x_{m,l} \in \{0, 1\}, \quad \forall m \in M, \forall l \in L \quad (1.33)$$

$$y_{o_{i,j},l} \in \{0, 1\}, \quad \forall o_{i,j} \in O^+, \forall l \in L \quad (1.34)$$

La fonction objectif minimise la somme des temps de transport (1.28). Les contraintes (1.29) et (1.30) assurent une bijection entre l'ensemble des machines et des zones de transport. Les contraintes (1.31) attribuent une zone de production à chaque opération tandis que les contraintes (1.32) garantissent que les opérations seront effectuées sur des machines compatibles.

Les limites de ce modèle est qu'il ne permet la prise en compte que des déplacements à charge des véhicules. Or, [4, 3] soulignent que les déplacements à vide des véhicules sont aussi coûteux que les déplacements à charge, et qu'il est donc important de pouvoir les prendre en compte. La difficulté est que les temps à vide dépendent de la séquence des transports et sont très difficiles à estimer sauf pour des cas particuliers. [9] proposent alors une métaheuristique hybride pour résoudre ce problème tout en considérant la prise en compte des temps de transport. La première phase consiste à résoudre avec une méthode exacte le problème d'affectation quadratique présenté ci-dessus. La deuxième phase prend en compte les temps de déplacement à vide en utilisant une approche s'apparentant à un GRASP. Des solutions sont générées en utilisant le paradigme des colonies de fourmis. L'affectation obtenue lors de la phase 1 sert à définir les probabilités utilisées dans la construction de nouvelles affectations. Ces nouvelles affectations sont évaluées en résolvant un problème de job-shop avec transport (ordonnancement conjoint des moyens de production et de transport). La technique utilisée est une recherche locale itérée couplée avec un modèle de simulation à événements discrets. Les résultats montrent que même sur des instances de petite taille (cinq zones de production), l'affectation obtenue à l'issue de la phase 1 peut être améliorée dans plus de 50% des cas. La méthode proposée se note ((PLNE) → ((ACS)↓(ILS ⇔ simul)))

1.4 Conclusion

Les systèmes logistiques en général, et la chaîne logistique en particulier, sont des systèmes complexes composés de nombreux acteurs qui ont chacun leur intérêt propre mais qui doivent collaborer pour que l'ensemble du système soit le plus efficace possible. Dans ce chapitre, nous avons voulu montrer toute la complexité qui pouvait résulter de l'étude de ces systèmes, et donner quelques pistes pour les résoudre. Pour cela, nous avons relayé l'intérêt que représentent les métaheuristiques pour les chercheurs du domaine. Ces méthodes d'optimisation possèdent en effet de nombreux atouts qui leur permettent de répondre à beaucoup des spécificités des systèmes logistiques.

Nous avons également expliqué en quoi la prise en compte de la synchronisation horizontale et/ou verticale était pertinente. Pour ce type de problématique, la mise en place de techniques hybrides est souvent une solution qui s'impose. Nous avons introduit les concepts de chaînage, de couplage séquentiel et de couplage hiérarchique qui permettent de combiner une métaheuristique avec une autre méthode d'optimisation ou une méthode d'évaluation des performances. Si l'importance de la synchronisation dans les systèmes logistiques est reconnue depuis longtemps par de nombreux chercheurs, le champ d'investigation dans le domaine est encore largement ouvert. Avec l'apparition de problématiques émergentes telles que la logistique inverse, la logistique verte ou l'intégration de la gestion des risques, les systèmes logistiques s'enrichissent de nouvelles activités, de nouvelles règles de fonctionnement ou de nouveaux indicateurs de performances qui viennent encore élargir les perspectives d'étude.

Gageons que l'activité scientifique dans le domaine restera très active durant les prochaines années.

CHAPTER 1. TECHNIQUES D'HYBRIDATION À BASE DE
MÉTAPHYSIQUES POUR OPTIMISER DES SYSTÈMES LOGISTIQUES

Bibliography

- [1] W. Abo-Hamad and A. Arisha. Simulation-optimisation methods in supply chain applications: A review. *Irish Journal of Management*, 1:95–124, 2010.
- [2] J. April, F. Glover, J. P. Kelly, and M. Laguna. Practical introduction to simulation optimization. In *Simulation Conference, 2003. Proceedings of the 2003 Winter*, volume 1, pages 71–78, 2003.
- [3] A. Asef-Vaziri, N. G. Hall, and R. George. The significance of deterministic empty vehicle trips in the design of a unidirectional loop flow path. *Computers & Operations Research*, 35:1546–1561, 2008.
- [4] A. Asef-Vaziri, G. Laporte, and R. Ortiz. Exact and heuristic procedures for the material handling circular flow path design problem. *European Journal of Operational Research*, 176:707–726, 2007.
- [5] J. C. Beck, T. K. Feng, and J. P. Watson. Combining constraint programming and local search for job-shop scheduling. *INFORMS Journal on Computing*, 23(1):1–14, 2011.
- [6] C. Blum, J. Puchinger, G.R. Raidl, and A. Roli. Hybrid metaheuristics in combinatorial optimization : a survey. *Applied Soft Computing*, 11:4135–4151, 2011.
- [7] M. Boccia, Crainic, T. G., A. Sforza, and C. Sterle. *Experimental Algorithms*, chapter A metaheuristic for a two echelon location-routing problem, pages 288–301. Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [8] B. De Backer, V. Furnon, P. Shaw, P. Kilby, and P. Prosser. Solving vehicle routing problems using constraint programming and metaheuristics. *Journal of Heuristics*, 6(4):501–523, 2000.
- [9] L. Deroussi and M. Gourgand. *Heuristics: Theory and Applications*, chapter A Scheduling Approach for the Design of Flexible Manufacturing Systems, pages 161–222. NOVA publishers, 2013.
- [10] R. Desai and R. Patil. Salo: combining simulated annealing and local optimization for efficient global optimization. In *Proceedings of the 9th Florida AI Research Symposium (FLAIRS-’96)*, pages 233–237, 1996.
- [11] I. Dumitrescu and T. Stützle. Combinations of local search and exact algorithms. In *EvoWorkshops*, pages 211–223, 2003.
- [12] T.A. Feo and M.G.C. Resende. A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem. *Operations Research Letters*, 8:67–71, 1989.

- [13] S. Fernandes and H. Lourenço. Hybrids combining local search heuristics with exact algorithms. In *V Congreso Español sobre Metaheurísticas, Algoritmos Evolutivos y Bioinspirados*, pages 269–274, 2007.
- [14] F. Focacci, F. Laburthe, and A. Lodi. Local search and constraint programming. *International Series in Operations Research and Management Science*, 57:369–404, 2003.
- [15] J.W. Forrester. Industrial dynamics. Technical report, MIT Press, Cambridge, MA, 1961.
- [16] M. C. Fu. Optimization for simulation: Theory vs. practice. *INFORMS Journal on Computing*, 14(3):192–215, 2002.
- [17] R. Ganeshan and T. Harrison. An introduction to supply chain management. Technical report, Penn State University, Department of Management Science and Information system operations. Prentice Hall, New Jersey, 1995.
- [18] S.E. Griffis, J.E. Bell, and D.J. Closs. Metaheuristics in logistics and supply chain management. *Journal of Business Logistics*, 33:90–106, 2012.
- [19] L. Jourdan, M. Basseur, and E. G. Talbi. Hybridizing exact methods and metaheuristics: A taxonomy. *European Journal of Operational Research*, 199(3):620–629, 2009.
- [20] P. Kouvelis, C. Chambers, and H. Wang. Supply chain management research and production and operations management: Review, trends, and opportunities. *Production and Operations Management*, 15(3):449–469, 2006.
- [21] E. V. Krmac. *Supply Chain Management - New Perspectives*, chapter Intelligent Value Chain Networks: Business Intelligence and Other ICT Tools and Technologies. Sanda Renko, ISBN 978-953-307-633-1, 2011.
- [22] T. Le-Anh. *Intelligent Control of Vehicle-Based Internal Transport Systems*. PhD thesis, Erasmus, University Rotterdam, The Netherlands, 2005.
- [23] D. Lemoine. *Modèles génériques et méthodes de résolution pour la planification tactique mono-site et multi-site*. PhD thesis, Université Blaise Pascal, France, 2008.
- [24] H.R. Lourenço. Supply chain management: An opportunity for metaheuristics. Technical report, Université Pompeu Fabra, Barcelone, Espagne, 2001.
- [25] O.C. Martin and S.W. Otto. Combining simulated annealing with local search heuristics. *Annals of Operations Research*, 63:57–75, 1996.
- [26] F. D. Mele, A. Espuna, and L. Puigjaner. Supply chain management through a combined simulation-optimisation approach. *Computer Aided Chemical Engineering*, 20:1405–1410, 2005.
- [27] P. Merz and B. Friesleben. Genetic local search for the tsp: New results. In *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, IEEE Press, Indianapolis, USA, pages 159–164, 1997.

- [28] H. Meyr, M. Wagner, and J. Rohde. *Structure of advanced planning systems, Supply Chain Management and Advanced Planning - concepts, models, software and case studies*. Stadtler H., Kilger C., Springer-Verlag, Berlin, 2002.
- [29] P. Moscato. On evolution, search, optimization, genetic algorithms and martial arts: Towards memetic algorithms. In *Caltech concurrent computation program, C3P Report*, volume 826, 1989.
- [30] G. Nagy and S. Salhi. Location-routing: issues, models and methods. *European Journal of Operational Research*, 177:649–672, 2007.
- [31] M. C. Nascimento, M. G. Resende, and F. Toledo. Grasp heuristic with path-relinking for the multi-plant capacitated lot sizing problem. *European Journal of Operational Research*, 200(3):747–754, 2010.
- [32] A. Nikolopoulou and M. G. Ierapetritou. Hybrid simulation based optimization approach for supply chain management. *Computers & Chemical Engineering*, july 2012.
- [33] Sylvie Norre. *Heuristique et Métaheuristiques pour la résolution de problèmes d’optimisation combinatoire dans les systèmes de production*. Habilitation à Diriger des Recherches, 2005.
- [34] J. Orlicki. *Material Requirements Planning*. Mc Graw-Hill, Londres, 1975.
- [35] C. Prins, C. Prodhon, A. Ruiz, P. Soriano, and R. W. Calvo. Solving the capacitated location-routing problem by a cooperative lagrangean relaxation-granular tabu search heuristic. *Transportation Science*, 41(4):470–483, 2007.
- [36] J. Puchinger and G. R. Raidl. *Artificial intelligence and knowledge engineering applications: a bioinspired approach*, chapter Combining metaheuristics and exact algorithms in combinatorial optimization: A survey and classification, pages 41–53. Springer Berlin Heidelberg, 2005.
- [37] C. R. Reeves and T. Yamada. Genetic algorithms, path relinking, and the flow-shop sequencing problem. *Evolutionary Computation*, 6(1):45–60, 1998.
- [38] M.G.C. Resende and C.C. Ribeiro. *Metaheuristics: Progress as Real Problem Solvers*, chapter GRASP with path-relinking: Recent advances and applications, pages 29–63. Springer, 2005.
- [39] M. Sambasivan and S. Yahya. A lagrangean-based heuristic for multi-plant, multi-item, multi-period capacitated lot-sizing problems with inter-plant transfers. *Computers & Operations Research*, 32(3):537–555, 2005.
- [40] G. Schmidt and W.E. Wilhelm. Strategic, tactical and operational decisions in multi-national logistics networks : a review and discussion of modeling issues. *International Journal of Production Research*, 38(7):1501–1523, 2000.
- [41] D. Simchi-Levi, P. Kaminsky, and E. Simchi-Levi. *Designing and managing the supply chain; concepts, strategies and case studies*. Irwin/ Mc Graw Hill, 2000.
- [42] S.V. Snyder. Facility location under uncertainty : a review. *IIE Transactions*, 38(7):537–554, 2006.

- [43] M. Suon, N. Grangeon, S. Norre, and O. Gourguechon. Un problème de planification stratégique de type production – distribution avec economies d'échelle et technologies de production. In *MOSIM 2010 (8ème Conférence Internationale de Modélisation et Simulation)*, 10 au 12 mai 2010, Hammamet, Tunisie, 2010.
- [44] E.G. Talbi. A taxonomy of hybrid metaheuristics. *Journal of Heuristics*, 8:541–564, 2002.
- [45] A. Thomas and S. Lamouri. Flux poussés : Mrp et drp. *Techniques de l'ingénieur*, AGL1(AG5110):1–12, 2000.
- [46] M. Van Hentenryck and L. Michel. *Constraint-based local search*. MIT Press, 2009.
- [47] O. Wight. *Manufacturing Resource Planing : MRP II*. Oliver Wight éditeur, 1984.
- [48] J. Wolf. *The nature of supply chain management research*. Springer Science, 2008.